УДК 620.179.15

АНАЛИЗ СИСТЕМ СКАНИРОВАНИЯ В КОМПТОНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ. ВОЗМОЖНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Б.И. Капранов, И.А. Короткова, В.Л. Чахлов, В.Н. Филинов, В.Я. Маклашевский

Проведен обзор наиболее известных схем и устройств сканирования комптоновской томографии, проанализирован их принцип работы. Описана область применения установок, указан перечень контролируемых объектов. Для одних из последних разработок томографов "TomScan-200" и CBS LBD приведены апертурные функции рассеивающего объема сканирующей системы, обосновано их применение с точки зрения улучшения пространственного разрешения систем

В настоящее время основным методом, применяемым для определения внутренней структуры различных типов объектов, является трансмиссионная томография, основанная на использовании ослабления проходящих потоков излучения. Кванты, прошедшие через объект контроля, не несут координатной информации в направлении зондирующего пучка. Известны и могут быть использованы только координаты пучка в плоскости, перпендикулярной его оси. В связи с этим, восстановление плотности среды по третьей координате может быть осуществлено только по набору проекционных данных.

Принципиальное отличие имеет использование комптоновски рассеянных квантов. Как указано в одной из первых работ по комптоновской томографии [1], преимущество использования рассеянных фотонов состоит в том, что каждый из них несёт информацию о положении точки взаимодействия на первичном луче, или точную позиционную информацию. Если первичный пучок локализован в плоскости, перпендикулярной ему, то локализация вторичного (однократно рассеянного) излучения однозначно определяет третью координату. Т.е. коллимация первичных и рассеянных потоков позволяет получить трехмерное распределение электронной плотности среды без использования сложных математических преобразований. Дополнительным преимуществом комптоновской томографии является линейная зависимость сигнала от электронной плотности и, следовательно, связанной с ней объёмной плотности.

Анализ состояния исследований по томографии на комптоновском обратном рассеянии, проведенный по патентным и литературным материалам, позволил выявить основные направления проводимых работ, уровень достигнутых результатов при решении отдельных задач, основные трудности на пути практической реализации метода, перспективы направления исследований. Анализ тенденций развития показал, что основными параметрами устройств томографии на комптоновском обратном рассеянии, определяющими их потребительские свойства, как и для трансмиссионных томографов, являются: пространственная разрешающая способность, разрешение по плотности, время получения изображения, массогабаритные характеристики. Главные препятствия на пути создания промышленных установок это: чрезвычайно высокие требования к точности позиционирования сканирующих систем, малые интенсивности потоков обратно рассеянного излучения, выходящего из малых элементов объёма тела, влияние ослабления первичных и рассеянных пучков на результаты измерения электронной плотности в элементе объёма, ограничение проекционных данных из-за одностороннего доступа.

Интерес к комптоновской томографии возрастает в связи с последними достижениями в области трансмиссионной томографии и наличием широкого класса объектов, контроль которых трансмиссионной томографией неэффективен.

Среди многообразия разработанных систем комптоновской томографии можно выделить основные тенденции, схемы, способы реализации повышения эффективности метода.

Один из простейших методов увеличения интенсивности потока квантов, регистрируемых де-

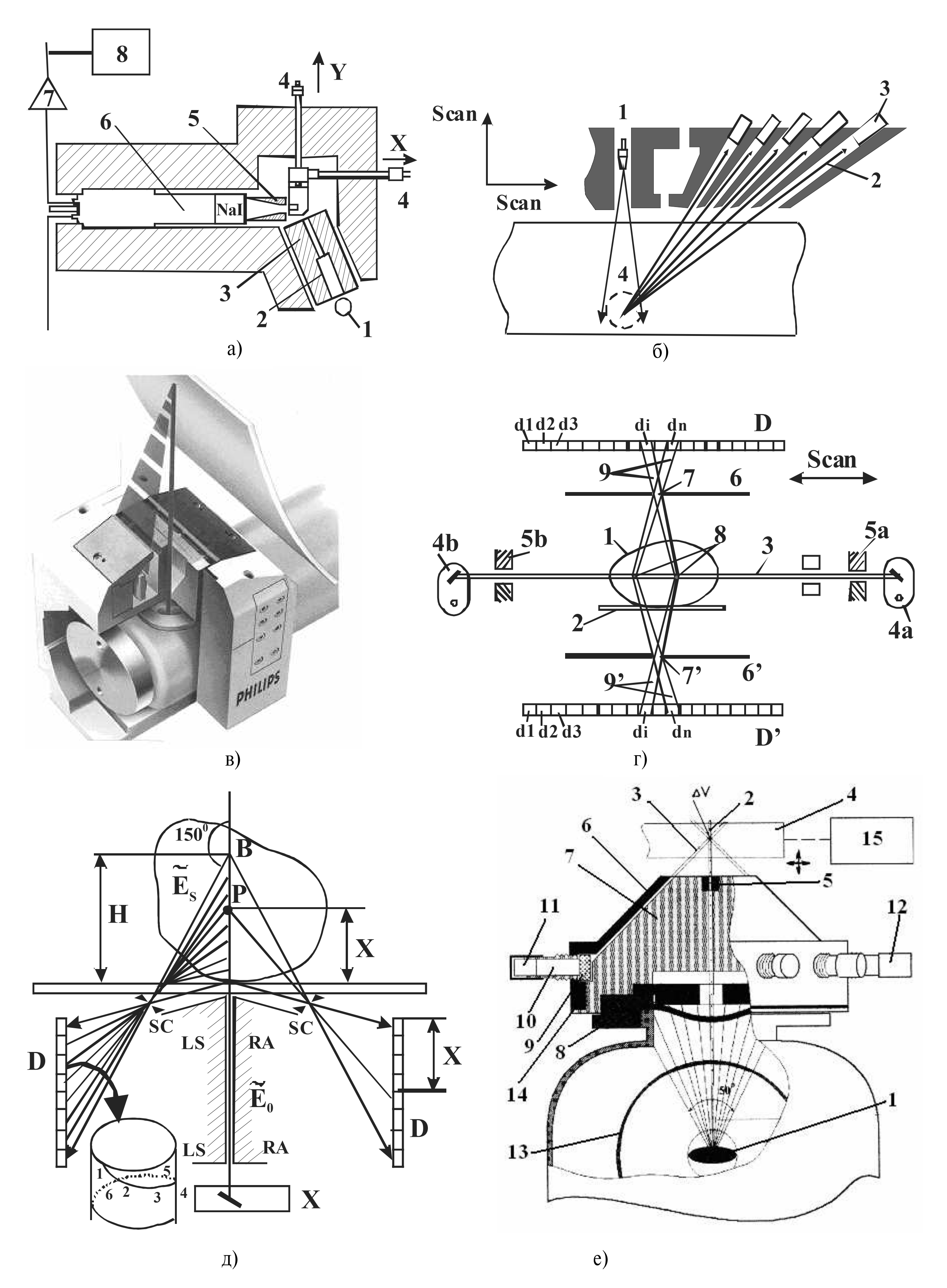


Рис. 1. *Устройства комптоновской томографии: а) система на базе изотопа ¹³³Ba; б) фокусирующий коллиматор для регистрации обратно рассеянного излучения; в) сканирующая система комптоновского томографа ComScan; г) система сканирования с помощью кольцевой щели; д) система сканирования с кольцевым пинхолом; е) рентгеновский томограф на обратном рассеянии "TomScan-200"*

тектором - это увеличение активности источника. В [2] описаны первые эксперименты с маломощным источником ^{133}Ba активностью 1,4 mKu (рис. 1, *а*). Данная система включает: 1 - шток источника, 2 - источник излучения; 3 - коллиматор источника, 4 - XYZ микроманипулятор, 5 - коллиматор детектора, 6 - сцинтилляционный детектор, 7 - усилитель, 8 - осциллограф. В результате двухкоординатного шагового сканирования с временем измерения в одной точке 300 с получены развёртки слоя, расположенного на глубине 300 мм с разрешением, позволяющим обнаруживать отверстия диаметром 6 мм.

Другой стандартный метод - повышение эффективности сбора рассеянных квантов за счёт использования фокусирующих и многоканальных коллиматоров, которые увеличивают телесный угол сбора рассеянных квантов. На рис. 1, *б* приведена конструкция фокусирующего коллиматора для регистрации обратно-рассеянного излучения, где 1 - коллимированный источник излучения, 2 - один из каналов коллиматора, 3 - один из детекторов, 4 - "фокальная" область коллиматора. Кроме того, используют два и более детекторных блоков [3].

Еще один пример оптимального использования излучения - установка "ComScan" разработки Гамбургской лаборатории фирмы "Philips" [4]. Коллиматоры источника максимально приближены к аноду рентгеновской трубки. Все остальные расстояния также минимизированы. Сканирование вдоль луча осуществляется линейной матрицей детекторов, разбитой на две группы по 11 сцинтилляторов, расположенных по разные стороны от зондирующего пучка. Каждый из элементов детектора видит "свою" зону по глубине объекта. Вся толщина объекта разбивается на 22 зоны по количеству детекторных элементов. Детекторы состоят из пластин сцинтиллятора, каждая из которых с помощью световода соединена со своим фотоумножителем. Поперечные размеры зондирующего пучка 0,4х0,4 мм. Аналогичная система с рентгеновским аппаратом на 320 кВ и детекторами на основе кристаллов NaI(Tl) описана в [5, 6].

Контролируемые изделия устанавливаются на специальном столе, движение которого управляется микропроцессором. Установка позволяет обнаруживать расслоения в углепластике толщиной 0,2 мм, производить дефектоскопию изделий, измерять плотность, содержание веществ, эффективный атомный номер, толщину многослойных пластин, покрытий. В 1993 г. "Philips" начала рекламу новой модификации томографа ComScan, выполненной уже в транспортабельном виде и представляющей собой промышленный вариант (рис. 1, *в*) [7]. Принцип работы не отличается от предыдущей модели, но существенно уменьшены габариты и вес датчика. Более совершенная обработка позволила улучшить качество изображений.

Информация о полной коррекции ослабления первичного и рассеянного пучков в геометрии чисто одностороннего доступа не обнаружена. Разработчики используют различные подходы. Так, в [8, 9] пренебрегают ослаблением и измеряют распределение электронной плотности. Получаемое изображение обладает низким качеством, т.к. содержит много артефактов из-за влияния неоднородностей материала в соседних областях.

В [10] проведена попытка решения задачи коррекции ослабления первичного пучка (рис. 1, *г*). Объект облучают двумя источниками в противоположных направлениях.

Схема облучения объекта контроля состоит из: 2 - предметного стола, 3 - узкого пучка рентгеновского излучения, 4a, 4b - рентгеновских трубок, 5a, 5b - первичных коллиматоров, 6, 6' - перемещающихся вторичных коллиматоров с кольцевой щелью, 7, 7' - кольцевых щелей. На рисунке также показаны объект контроля - 1, рассеивающие объемы, образуемые пересечением первичного излучения и зоной чувствительности детекторов - 8, рассеянные пучки 9, 9', регистрирующие элементы детекторов d_1-d_n.

Сумма интенсивностей пучков от обоих источников дает в объекте контроля луч с постоянной интенсивностью. Линейные детекторы через щелевые диафрагмы просматривают объект вдоль луча.

Объектный стол перемещается вертикально, осуществляя развертку по оси OY. Метод применим только при наличии двустороннего доступа и ослабления рассеянного излучения не компенсирует.

Полную компенсацию ослабления на всех участках движения пучков можно получить с помощью метода, предложенного в [10]. Он основан на использовании нескольких источников с разными энергиями и проведении серии измерений с разными позициями источников и детекторов. Если энергии источников и позиции будут подобраны таким образом, что по каждому участку будут проходить два пучка с одинаковой энергией (первичный и рассеянный), то может быть составлена система уравнений, из которой однозначно определяется электронная плотность в элементе объема. Однако такая геометрия требует минимум 4-х положений, два из которых находятся с противоположной стороны объекта контроля.

Проведенный анализ не выявил корректного способа учета многократного рассеяния при одностороннем доступе к объекту контроля.

Среди всего многообразия схем сканирования следует отметить детектор с круговой щелью [11]. Для повышения эффективности сбора рассеянных квантов с линии рассеяния в объекте B (рис. 1, *д*), каждый элемент линейки детекторов D развёрнут в кольцо. Первичный пучок излучения от рентгеновской трубки X формируется первичным коллиматором RA, а для пространственного отбора обратно рассеянных квантов служит кольцевой пинхол SC, находящийся в защите LS. Обратно рассеянные кванты, сколлимированные пинхолом, регистрируются цилиндрическими детекторами D. Пересечение первичного и рассеянного пучков излучения

формируют рассеивающий объем P, который может перемещаться в пределах зоны сканирования H. Данная геометрия является одной из наиболее эффективных.

Одним из основных параметром комптоновской томографии, как и трансмиссионной, является пространственная разрешающая способность. При разработке систем авторы обычно рассматривают этот вопрос в приближении параллельных пучков первичного и рассеянного излучения [12-14], что не позволяет судить о реальной разрешающей способности. Более подробно вопрос о разрешающей способности комптоновских сканеров рассмотрен в [15] на примере анализа системы "TomScan-200", разработанной в НИИ интроскопии г. Томска, конструкция которого представлена на рис. 1, *е*. Элементы томографической установки: 1 - анод рентгеновской трубки; 2 - первичный пучок излучения диаметром 1 мм; 3 - обратно-рассеянный пучок излучения; 4 - объект; 5 - формирующий коллиматор первичного пучка; 6 - формирующий коллиматор рассеянного пучка; 7 - защита; 8 - бленда; 9 - кольцевой сцинтилляционный кристалл CsJ(Tl); 10 - фотоумножитель ФЭУ-60; 11 - предусилитель; 12 - детектор (20 шт.); 13 - колба рентгеновской трубки; 14 - регулирующая прокладка; 15 - сканирующий механизм.

Принцип действия томографа основан на регистрации излучения, рассеянного назад из рассеивающего объема ΔV, формировании массива данных из 256x256 элементов при перемещении объема ΔV в плоскости x, y с шагом 0,1 мм и реконструкции по этому массиву данных распределения плотности в поперечном сечении объекта. При этом требования к значению разрешающей способности системы составляют 0,1 мм.

Для более точного восстановления внутренней структуры объекта контроля необходимо знание геометрии рассеивающего объема, создаваемого коллимационной системой источника излучения и системой детекторов. На рис. 2, *а* представлена классическая схема сканирования, соответствующая томографу "TomScan-200", в которой источник излучения является центральным, а коллиматоры детектора расположены по кольцу. Рассеивающий объем имеет сложную геометрическую форму, математическое описание которой не совсем тривиально. Математическое описание процесса сканирования таким рассеивающим объемом по трем координатам, полученное нами, позволило сформулировать функциональные зависимости, описывающие форму рассеивающего объема по всем трем координатам.

Также одной из новых разработок является установка CBS LBD китайского производства [16]. Система состоит из: I - источника излучения, C_1 - коллиматора источника, C_2 - фокусирующего коллиматора детекторов, собранного из стальных

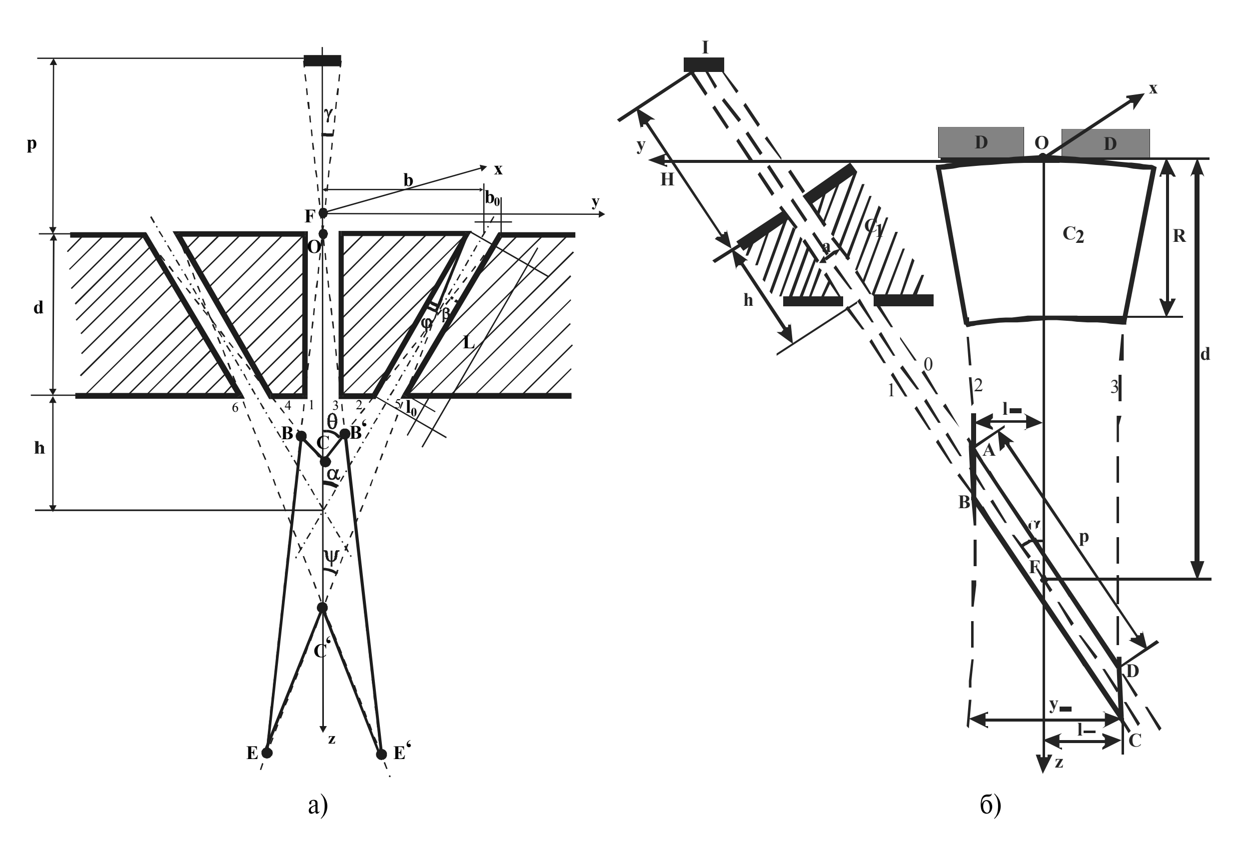


Рис. 2. *Геометрии схем сканирования комптоновской томографии: а - геометрия коллимационной системы источник-детектор томографа "TomScan-200", б - сканирующие системы томографа CBS LBD*

пластин, D - детекторов. В качестве излучателя могут использоваться гамма-источники ^{192}Ir, ^{137}Cs и рентгеновский аппарат "Smart-300" на 300 кВ, что позволяет расширять диапазон глубин контроля для различных типов материалов исследуемых объектов. При этом пространственное разрешение системы составляет порядка 0,3 мм. Аналогично томографу "TomScan-200", принцип работы данной системы основан на регистрации обратно рассеянных квантов из рассеивающего объема, формируемого системой источник - детектор. Схематическое изображение сканирующей системы томографа представлена на рис. 2, *б*.

Комптоновская томография позволяет решить круг задач, не решаемых с помощью известных систем томографии. К ним относятся: контроль многослойных корпусов торпедных катеров и других объектов; контроль состояния сварных швов в процессе эксплуатации, расположенных за покрытиями и изоляционными слоями; контроль многослойных неметаллических конструкций, сотовых конструкций, корпусов изделий в ракетно-космической и авиапромышленности.

Широкий класс подобных задач контроля существует и в других отраслях промышленности и в диагностике. Это досмотр багажа, транспорта на предмет перевоза взрывчатых веществ; контроль бетонных конструкций в строительстве; контроль качества изготовления многослойных плит, покрытий конструкций в деревообрабатывающей промышленности с целью отработки технологии производства; контроль сосудов, резервуаров, работающих с опасными реагентами в химическом машиностроении; контроль печатных плат, кристаллов и других элементов в электронике; контроль турбогенераторов, трубопроводов, задвижек в области энергетики; контроль объектов в нефтяной и газовой промышленности.

Таким образом, томография на комптоновском обратном рассеянии обладает преимуществами при решении некоторого класса задач неразрушающего контроля (односторонность доступа, неоднородные материалы, невозможность механического контакта с объектом контроля) и поэтому имеет свою область применения. Анализ показывает, что для расширения сферы применения комптоновской томографии необходимо:

- повышать пространственную и плотностную разрешающую способность;
- увеличивать диапазон контролируемых толщин;
- уменьшать дозовую нагрузку на объект контроля;
- увеличивать производительность контроля;
- совершенствовать схемы сканирования с учетом ограниченности пространства детектирования;
- развивать алгоритмы и программную часть реконструкции.

Выполненные в НИИ ИН ТПУ исследования показали, что возможности улучшения пространственного разрешения за счет уменьшения поперечных размеров пучков ограничены из-за ухудшения статистики квантов и вклада многократного рассеяния. Единственная возможность - это совершенствование систем сбора и обработки информации и разработки аппарата реконструкции по интегральным альбедным данным.

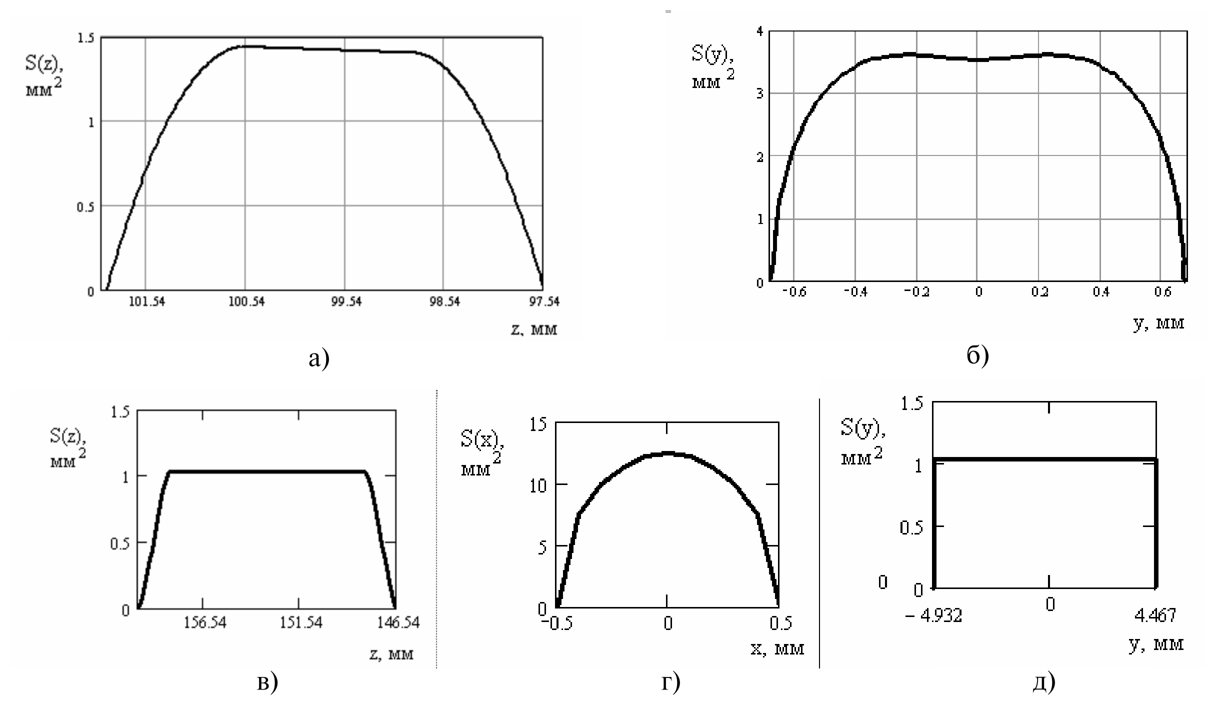


Рис. 3. *Апертурные функции: а, б) для системы "TomScan-200", в, г, д) для системы CBS LBD*

В частности, при восстановлении изображений объекта контроля необходимо учитывать реальную апертурную функцию сканирующей системы, которая участвует в процессе реконструкции и влияет на точность получения информации об объекте контроля.

Для рассмотренных систем "TomScan-200" и CBS LBD с применением математических алгоритмов [17] были построены апертурные функции при сканировании в различных направлениях, представленные на рис. 3.

Полученные апертурные функции позволяют выбрать оптимальное направление сканирования для каждой из систем, а также являются необходимыми и достаточными для использования их в алгоритме реконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lale P.G. The examination of internal tissues, using gamma ray with a possible extention to megavoltage radiography // Phys. Med. Biol. - 1959. - V. 4. - № 4. - P. 159-166.
2. Bridge B., Harirchian P., Imrie D.C., Mehrabi J., Meradi A.R. Experiments in Compton scatter imaging of materials with wide ranging densities using low-activity gamma-sourse // NDT. - 1987. - № 6. - P. 339-346.
3. Bridge B. Offshore underwater applications of ionizing radiations; a theoretical study of the relative performance of film and arrange of small aperture radiations detectors // Report № 799/797/267 (Brunel Industrial Services Buream), December, 1981.
4. Roye W., Niemann W., Fischer K.-H. The X-ray backscatter tomography ComScan. International Symposium on Computer Tomography for Industrial Applications. - Berlin, 1995. - P. 136-139.
5. Babot, D., Berodias G., Malo P., Peix G. Controle, characterization et dimensionnement par diffusion Compton de rayons X ou gamma // Composites. - 1989. - № 2. Mart - April.
6. Berodias G., Peix G. Nondestructive measurement of density and effective atomic number by photon scattering // Mater. Evaluation. - 1988. - № 9. - P. 1200-1213.
7. Kosanetzky J., Harding G.H., Fischer K.H., Meyer A. Compton backscatter tomography of low atomic number materials with the surpass system. - Philips Forschungs laboratorium. - Humbugs, 1991.
8. Guzzardi R., Licitza G.A. critical review of Compton imaging. CRC Press Inc., Roca Raton. - 1987.
9. Guzzardi R., Licitza G.A. Principles and applications of Compton tomography for in vivo imaging // N. Sci. Appl. - 1988. - № 3. - P. 77-96.
10. Battista J.J., Santon L.W., Bronsell M.J. Compton scattering imaging of transverse section: corrections for multiple scatter and attenuations // Phys. Med. Biol. - 1977. - V. 22. - P. 229-234.
11. Harding R.G., Strecker A., Tishier R. X-ray imaging with Compton scatter radiation // Phys. Tech. Rev. - 1983/84. - V. 41. - № 2. - P. 46-59.
12. В.З. 3035524 ФРГ. МКИ G01T 1/29. Устройство для просвечивания с регистрацией рассеянного излучения. Phil. Pat. GMBH. Публ. 25.08.80 г.
13. В.З. 2944147 ФРГ. МКИ G01T 1/29. Устройство для получения распределения плотности в плоской области исследования при регистрации рассеянного излучения. - Phil. Pat. GMBH. Публ. 14.05.81 г.
14. В.З. 2544354 ФРГ. МКИ G01N. Способ определения плотности некоторых объектов при помощи проникающего излучения и устройство для его осуществления. Siemens A.G. Публ. 1978 г.
15. Капранов Б.И., Шаверин В.А., Алхимов Ю.В., Варга В.В., Сидуленко О.А., Маклашевский В.Я., Филинов В.Н. Алгоритмы и программное обеспечение комптоновского томографа "TomScan-200" // Известия ТПУ. - 1998. - С. 111-127.
16. Фирстов В., Бронников А., Пронин С., Кузнецов А. и др. Метрологические аспекты радиационных интроскопических систем на основе регистрации обратнорассеянного излучения // Контроль. Диагностика. - 1999. - № 11. - С. 18-25.
17. Kapranov B.I., Korotkova I.A. Increase of spatial resolution the Compton tomography TomScan-200 due to optimization of aperture function of disseminating volume / Proc. 5th Korea - Russia Int. Symp. on Science and Technology, June 26 - July 3, 2001. - Tomsk, Vol. 1. - P. 360-362.